



## تحلیل المان محدود و بررسی آزمایشگاهی فرایند شکل دهی داغ ورق آلیاژ آلومینیوم توسط گاز

مائده السادات ضوئی<sup>۱</sup>، محمود فرزین<sup>۲\*</sup>، امیرحسین محمدی<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۳- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

\*اصفهان، کدپستی ۸۴۱۵۶. farzin@cc.iut.ac.ir

**چکیده** - آلیاژهای آلومینیوم به دلیل وزن کم و مقاومت خوردگی بالا در صنعت خودرو مورد توجه قرار گرفته‌اند. اما به دلیل شکل پذیری کم و کیفیت پایین سطح محصول نهایی حاصل از این آلیاژها در دمای اتاق فرایندی جدید در دهه اخیر تحت عنوان شکل دهی داغ فلز توسط گاز معرفی شده است. این مقاله بررسی روش نوین شکل دهی داغ ورق آلیاژ آلومینیوم توسط گاز می‌باشد. برای مطالعه فرایند مزبور روش آزمایشگاهی و ساخت تجهیزات مورد نیاز شکل دهی ورم<sup>۱</sup> توسط گاز و تحلیل المان محدود (FEM)<sup>۲</sup> ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که امکان شکل دهی آلیاژ آلومینیوم در دماهای نزدیک به دمای ذوب آلیاژ، توسط شکل دهی با گاز فراهم شده و افزایش دما شکل پذیری را افزایش داده و فشار مورد نیاز شکل دهی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. نتایج تست‌های آزمایشگاهی انجام شده توسط نویسنده شامل حداکثر ارتفاع محصول، فشار گاز مورد نیاز شکل دهی برای حصول ارتفاع ماکزیمم و مقدار و مکان حداقل ضخامت محصول، تطابق نزدیکی با نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزاری دارد.

**کلید واژگان:** شکل دهی داغ، شکل دهی ورم، تحلیل المان محدود، آلیاژ آلومینیوم.

## Finite element analysis and experimental investigation on gas forming of hot aluminum alloy sheet

M. S. Zoei, M. Farzin<sup>1\*</sup>, A. H. Mohammadi<sup>2</sup>

1-Master of Science, Isfahan Univ. of Tech.

2-Assoc. Professor, Isfahan Univ. of Tech.

3-Master of Science, Isfahan Univ. of Tech.

\*P.O.B. 84156, Isfahan Iran. farzin@cc.iut.ac.ir

**Abstract** - Aluminum alloys are desirable in industry due to their excellent high-strength to weight ratio, corrosion resistance, and weldability. However, at room temperature, the formability and the surface quality of the final product of these alloys are low. So in recent decade, new process, hot metal gas forming, has been introduced. This paper investigated new method of hot aluminum alloys forming using gas. Experimental test for bulge forming was designed and made. In addition to experimental test, finite element analysis of process was done. Results showed that hot metal gas forming provides highest forming temperature for aluminum alloy blank and with increasing blank temperature up to optimum temperature of hot forming, there is reduced pressure forming and significant improvement of formability. Results of experimental test and finite element analysis including determination of optimum temperature for forming of special aluminum alloy, maximum formability in this process, required forming pressure, minimum thickness, thickness and temperature distribution were conformed.

**Keywords:** Hot forming, Bulge forming, Finite Element analysis, Aluminum alloy.

1. Bulge forming

2. Finite Element Method

## ۱- مقدمه

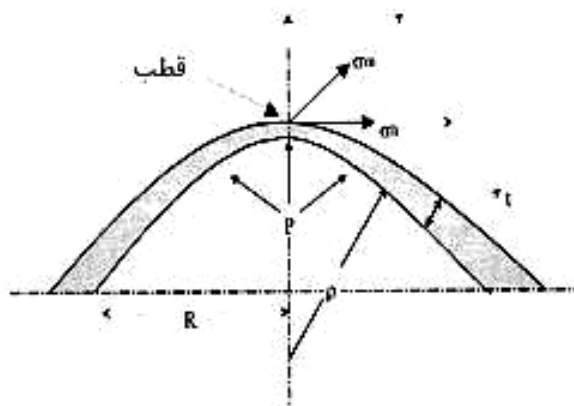
امروزه در صنعت خودرو به منظور کاهش مصرف سوخت و همچنین بهبود انعطاف پذیری طراحی و تولید قطعات پیچیده، کاربرد مواد سبک وزن مانند آلیاژهای آلومینیوم به صورت جدی مورد توجه قرار گرفته است، بنابراین صنعت خودرو نیازمند مواد و پروسه های تولید جدید برای طراحی خودروهای سبک و ایمن تر می باشد [۱].

هیدروفرمینگ پروسه ای جدید برای طراحی خودرو سبک می باشد، در این روش به جای سنبه و یا ماتریس، از فشار سیال برای شکل دهی استفاده می شود و قطعاتی یکپارچه حاصل می شوند که در گذشته با مونتاژ چند قطعه پرسکاری شده تولید می شدند. با استفاده از این روش، می توان قطعات را با استحکام بالاتر و ضخامت کمتر تولید کرد، بنابراین به کاهش وزن قابل توجهی دست یافت. همچنین با حذف نقاط جوش به واسطه تولید قطعات یکپارچه، صلبیت قطعه افزایش می یابد. اما هیدروفرمینگ دارای محدودیت شکل پذیری ضعیف فولادها (مخصوصاً استحکام بالا) و آلیاژهای آلومینیوم در درجه حرارت محیط و فشار بالای مورد نیاز است. این محدودیت ها بر طراحی قطعه، طراحی فرایند، طراحی ابزار و مونتاژ ابزار تأثیر نامطلوب می گذارند. علاوه بر این، هیدروفرمینگ زمان سیکلی آهسته ای دارد و سرعت شکل دهی پایین است، لذا برای تأمین سرعت تولید مورد نظر در صنعت خودرو چندین مرکز کاری بایستی همزمان عمل کنند. در هیدروفرمینگ لوله نیز تغذیه محوری معمولاً فقط در دو انتهای لوله باعث تغییر شکل بیشتر می شود و قابلیت کاربرد تغذیه محوری به مقدار قابل توجهی به نسبت طول لوله به قطر آن بستگی دارد. به دلیل فشار بالای شکل دهی در این فرایند، به پرسی با تناژ بالا نیاز می باشد و قالبها باید به گونه ای ساخته شوند که فشارهای بالارا تحمل کنند. همچنین استحکام مواد در طی هیدروفرمینگ تغییر نمی کند. در نتیجه این ویژگی، به کاربرد ماده خام با ویژگی های مطلوب نیاز می باشد. این امر دشواری شکل دهی و هزینه مواد خام و تناژ پرس مورد نیاز را افزایش می دهد. بنابراین تکنولوژی جدید توسط شکل دهی در دمای بالا برای غلبه بر این محدودیت ها مورد مطالعه قرار گرفته اند [۲]. علاوه بر این حداکثر درجه

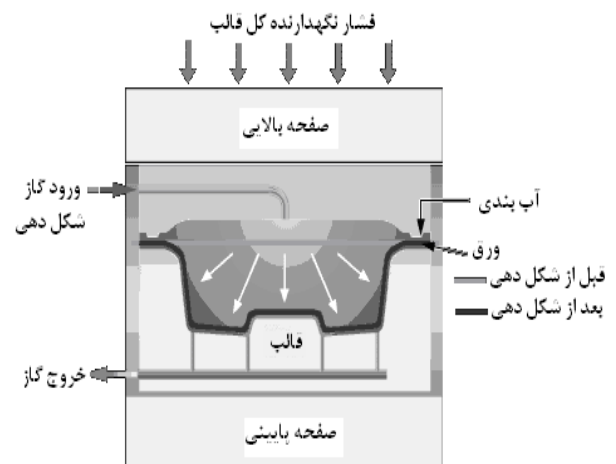
حرارت شکل دهی در فرایند شکل دهی با قالب و هیدروفرمینگ حدود  $300^{\circ}\text{C}$  می باشد. به واسطه عدم وجود سیال مناسب با قابلیت تحمل دمای بالا، فرایندی نوین برای شکل دهی داغ آلیاژهای آلومینیوم توسط گاز ارائه شده است.

در این پروسه ورق فلز تا رسیدن به درجه حرارت شکل دهی حرارت می بیند. ورق گرم شده توسط فشار گاز (نیتروژن، آرگون) در سطح پشتی ورق، به داخل ابزار شکل دهی کشیده می شود. این روش توسط جنرال موتور<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۸ به عنوان فرایند شکل دهی ورق آلیاژ آلومینیوم به شکل های پیچیده مانند پانل بدنه خودرو با قابلیت تولید بالا مطرح شد. در این تکنیک استحکام تسلیم ماده با افزایش درجه حرارت کاهش می یابد و قطعه می تواند به یک شکل پیچیده با کاربرد گاز کم فشار و با کاهش نیاز برای پرس تناژ بالا شکل گرفته شود. در فرایند شکل دهی داغ فلز توسط گاز، شکل پذیری مواد به صورت قابل توجهی توسط مکانیزم های تغییر شکل وابسته به درجه حرارت شامل ترکیب خزش نابجائی و لغزش مرزدانه، بهبود می یابد. پس از پروسه شکل دهی داغ فلز توسط گاز، قطعه گرم شده و شکل گرفته خنک می شود. مایع و یا هوا برای کوئینچ در طول محصول استفاده می شوند. توسط کنترل مقدار حرارت داده شده در طی پروسه شکل دهی و شرایط کوئینچ (زمان خنک کردن، نرخ جریان و یا درجه حرارت مایع) خواص متالورژیکی اجزای حاصله بهبود می یابد. به دلیل آن که مواد در طی شکل دهی داغ فلز توسط گاز، گرم و سپس کوئینچ می شوند، تنش های کمی در قطعه نهایی ایجاد شده و نیاز به عملیات حرارتی ثانویه کاهش می یابد. در این فرایند کل زمان های سیکلی مورد نیاز برای شکل دهی کم است، بنابراین مراکز تولیدی شکل دهی داغ فلز توسط گاز توانایی تولید قطعه در نرخ تولید دو تا سه برابر مراکز تولیدی هیدروفرمینگ متداول را خواهند داشت. این قابلیت، تعداد مراکز کاری مورد نیاز برای تأمین نیاز تولید را کاهش داده و بنابراین از هزینه ها کاسته می شود. شکل ۱ نمونه ای از شکل گیری ورق داغ توسط شکل دهی با اعمال فشار گاز را نشان می دهد [۳، ۴، ۵].

1. General Motors



شکل ۲ ورق متورم شده در شکل‌دهی ورم



شکل ۱ شکل‌دهی ورق داغ توسط گاز

در شکل‌دهی ورم برای شکل‌دهی یک نیم‌کره، تنش‌ها صفحه‌ای و از نوع تنش کششی مساوی دوماحور، در نقطه برآمدگی گنبدی شکل فرض می‌شوند. رابطه زیر برقرار است:

$$\sigma_h = \sigma_m \quad \sigma_t = 0 \quad \bar{\sigma} = \sigma_h \quad (1)$$

که  $\sigma_h$ ،  $\sigma_m$ ،  $\sigma_t$  و  $\bar{\sigma}$  به ترتیب تنش‌های محیطی<sup>۳</sup>، نصف‌النهاری<sup>۴</sup>، ضخامت<sup>۵</sup> و تنش معادل ون میز می‌باشند. تنش محیطی توسط رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$\sigma_h = \frac{P\rho}{2t} \quad (2)$$

که  $p$  فشار شکل‌دهی،  $\rho$  شعاع انحنا و  $t$  ضخامت ورق است. مولفه‌های کرنش برای کشش مساوی دوماحور با فرض حجم ثابت عبارتند از:

$$\varepsilon_h = \varepsilon_m \quad \varepsilon_h + \varepsilon_m + \varepsilon_t = 0 \quad \bar{\varepsilon} = \varepsilon_t \quad (3)$$

که  $\varepsilon_h$ ،  $\varepsilon_m$ ،  $\varepsilon_t$  و  $\bar{\varepsilon}$  به ترتیب کرنش‌های محیطی، نصف‌النهاری، ضخامت و کرنش معادل ون می‌باشند. در تست شکل‌دهی با نرخ کرنش ثابت، ضخامت ورق متورم  $t$  در زمان شکل‌دهی  $T$  به صورت رابطه (۴) به دست می‌آید:

در این مقاله روش نوین شکل‌دهی داغ ورق آلیاژ آلومینیوم AA۳۰۰۳ توسط گاز برای نخستین بار، در شرایط تست عملی و تحلیل المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. روش حرارت‌دهی به ورق و عایق‌بندی مجموعه به کار رفته در این بررسی، روشی نوین در فرایند شکل‌دهی داغ ورق می‌باشد.

## ۲- شکل‌دهی ورم

شکل‌دهی ورم به‌عنوان اولین قدم برای وارد شدن به آزمایشات عملی انتخاب گردید. ورق در تست ورم به شکل گنبد<sup>۱</sup> تغییر شکل می‌دهد که بالاترین نقطه آن قطب<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. به منظور جلوگیری از لغزش ورق بین قالب‌ها، نیروی ورق گیر بین قالب بالایی و پایینی بایستی به اندازه کافی بزرگ باشد. بنابراین در این تست ورق فقط اتساع یافته و هیچ کششی رخ نمی‌دهد. همچنین تغییر شکل در این تست متأثر از اصطکاک نمی‌باشد. پاره شدن ورق با کاهش ناگهانی فشار مشخص می‌شود. ارتفاع گنبدی حاصله در این تست در محدث شکل‌دهی به‌عنوان معیار شکل‌پذیری شناخته می‌شود. شکل ۲ ورق شکل‌گرفته در شکل‌دهی ورم را نشان می‌دهد.

3. Hoop  
4. Meridional  
5. Thickness

1. Dome  
2. Pole

با توجه به معادلات (۸) و (۱۰) هنگامی نقطه ناپایداری رخ می‌دهد که:

$$\frac{1}{\sigma_h} \frac{d\sigma_h}{d\varepsilon_t} = \frac{3}{2} - \frac{\rho}{2h} \quad (11)$$

و با بسط چند جمله‌ای  $\varepsilon_3$  نتیجه می‌شود:

$$\frac{1}{\sigma_h} \frac{d\sigma_h}{d\varepsilon_t} \approx \frac{11}{8} - \frac{1}{2\varepsilon_t} \quad (12)$$

اگر منحنی تنش - کرنش بر رابطه  $\bar{\sigma} = A(B + \bar{\varepsilon})^n$  منطبق شود، که در این رابطه  $A$  اندازه استحکام پایه ماده و مستقل از حالت اولیه است و  $B$  بیان‌گر حالت اولیه ماده و  $n$  اندازه میزان سختی ایجاد شده در اثر کرنش است (کرنش سختی)، کرنش ضخامتی قطبی در فشار حداکثر توسط معادله درجه دوم زیر حاصل می‌شود [۶].

$$11\varepsilon_t^2 + \varepsilon_t(11B - 8n - 8) - 8B = 0 \quad (13)$$

برای یک ماده کاملاً آنیل شده  $B$  صفر است و در نتیجه:

$$\varepsilon_r = \frac{8}{11}(2n + 1) \quad (14)$$

### ۳- تست آزمایشگاهی

تجهیزات به کار رفته در این بررسی عبارتند از: قالب، رینگ ورق‌گیر، گاز، ماده اولیه ورق در دو ضخامت ۰/۵ و ۱/۵ میلی‌متر، سیستم حرارتی، مانومتر، ترموکوپل. ماده مورد بررسی در این تحقیق آلیاژ آلومینیومی است که آنالیز ترکیب شیمیایی آن به روش کوانتومتری انجام شده و در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ آنالیز ترکیب شیمیایی ماده اولیه

عنصر	Al	Cu	Fe	Zn	Mn	Si
درصدوزنی	۹۸/۱۱	۰/۰۸	۰/۶۷	۰/۰۱	۱/۰۱	۰/۱۱۵

پس از کوانتومتری مشخص می‌شود که ورق، آلیاژ آلومینیوم AA۳۰۰۳ می‌باشد. این آلیاژ یکی از متداول‌ترین

$$t = t_0 \exp(-\dot{\varepsilon}T) \quad (4)$$

که  $t_0$  ضخامت اولیه ورق و  $\dot{\varepsilon}$  نرخ کرنش مؤثر می‌باشد. ترکیب روابط (۱) تا (۴)، رابطه (۵) را برای پروفیل فشار- زمان شکل‌دهی نتیجه می‌دهد.

$$P = 4 \frac{t_0}{R} \bar{\sigma} \exp(\dot{\varepsilon}T) [\bar{\sigma} \exp(-\dot{\varepsilon}T) (1 - \bar{\sigma} \exp(-\dot{\varepsilon}T))]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

که  $R$  شعاع قالب و  $\bar{\sigma}$  تنش جریانی مؤثر است. بنابراین رابطه (۵) می‌تواند برای کنترل فشار شکل‌دهی در تست آزمایشگاهی به کار برده شود [۵].

همچنین از روابط مذکور در تئوری هیل<sup>۱</sup> و نتایج حاصله در مورد کرنش ضخامتی به‌عنوان معیار ناپایداری در شبیه‌سازی استفاده می‌شود. بنابراین ضخامت نهایی بر اساس تئوری هیل به‌صورت زیر تعیین می‌شود.

از رابطه (۲) مقدار فشار به‌صورت رابطه (۶) می‌باشد:

$$P = \frac{2\sigma_h t}{\rho} \quad (6)$$

در ناپایداری  $dP = 0$  است و

$$\frac{d\sigma_h}{\sigma_h} = \frac{d\rho}{\rho} - \frac{dt}{t} \quad (7)$$

یا

$$\frac{1}{\sigma_h} \frac{d\sigma_h}{d\varepsilon_t} = 1 + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{d\varepsilon_t} \quad (8)$$

یک رابطه ساده هندسی برای ورم کروی<sup>۲</sup> عبارت است از:

$$h(2\rho - h) = R^2 \quad (9)$$

یا

$$\rho = (R^2 + h^2) / 2h \quad (10)$$

که  $h$  ارتفاع قطب است.

1. Hill  
2. Spherical Bulging



شکل ۴ ورق شکل گرفته در تست آزمایشگاهی

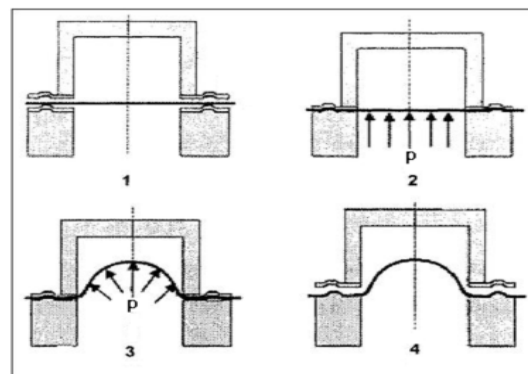
#### ۴- تحلیل المان محدود

هزینه شکل‌دهی ورق فلزی به دلیل قطعات پرهزینه مانند قالب، ورق گیر و سیستم‌های کنترلی بالا است. علاوه بر این، مرحله هزینه بر طراحی و تحلیل قبل از ساخت و مونتاژ نیز وجود دارد و توسعه مرحله عملی فرایند، بازه‌های طولانی از زمان را به خود اختصاص دهد. شبیه‌سازی به منظور تعیین امکان‌پذیری فرایند تولید، تحلیل و بهینه‌سازی کیفیت نهایی قطعات، تعیین پارامترهای فرایند و کاهش تعداد تست‌های آزمایشگاهی به کار برده می‌شود. علاوه بر این، داده‌های اولیه در مورد نیروها و فشارهای مورد نیاز شکل‌دهی را نیز به دست می‌آورد. با کاربرد روش المان محدود هزینه مرحله طراحی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و همچنین از سعی و خطا کاسته شده و در وقت و هزینه صرفه‌جویی می‌شود.

نرم‌افزار المان محدود ABAQUS/EXPLICIT به منظور شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی داغ ورق توسط گاز استفاده شده است. با در نظر گرفتن شرایط تست آزمایشگاهی و اعمال شرایط عایق‌بندی قالب، از انتقال حرارت مابین ورق و قالب در تحلیل صرف نظر می‌شود. ورق به صورت یک قطعه تغییرشکل‌پذیر<sup>۱</sup> تعریف شده و قالب و ورق گیر به صورت قطعات صلب<sup>۲</sup> مدل‌سازی می‌شوند. در تحلیل نرم‌افزاری، ابعاد دهانه قالب شکل‌دهی و ورق منطبق بر شرایط تست آزمایشگاهی ورم می‌باشد.

آلیاژهای غیر قابل عملیات حرارتی است و در مواردی که به قابلیت شکل‌پذیری خوب، مقاومت بسیار خوب در برابر خوردگی و قابلیت جوشکاری مناسب یا هر سه خاصیت فوق نیاز وجود داشته و استحکام بالاتری نیز نسبت به آلومینیوم غیر آلیاژی مد نظر باشد به کار برده می‌شود. حضور منگنز استحکام متوسط و شکل‌پذیری عالی به آلیاژ می‌دهد [۷].

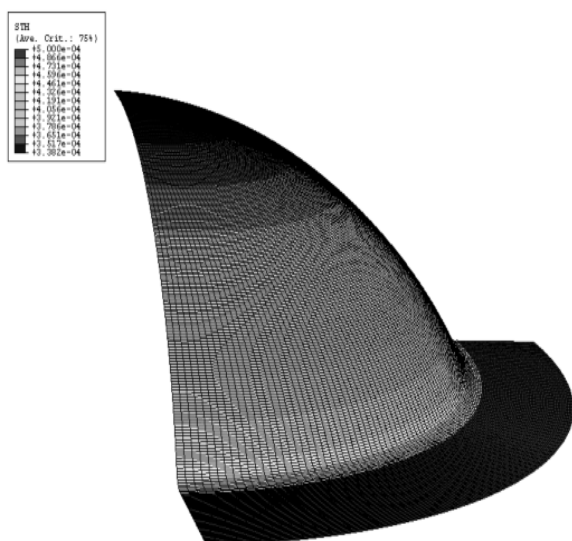
سیستم المان حرارتی قابلیت ایجاد حرارت تا دمای  $600^{\circ}\text{C}$  را داراست. کلیه المنت‌های حرارتی برقی براساس مقاومت بر سر راه جریان عمل می‌کنند و متشکل از سیمی با مقاومت مناسب و تحمل دمای بالا هستند. سیستم المان حرارتی به گونه‌ای است که قالب عایق بوده و از انتقال حرارت مابین ورق و قالب و اتلاف انرژی حرارتی جلوگیری می‌شود. گاز کاربردی، ازت (نیتروژن) است. مقدار فشار گاز شکل‌دهی کمتر از فشار شروع اولین ترک است. ترموکوپل ابزاری برای اندازه‌گیری دمای هر نقطه به روش تماسی، توسط تبدیل انرژی گرمایی به انرژی الکتریکی می‌باشد. این وسیله از اتصال دو مفتول فلزی غیر هم نوع در یک نقطه ساخته می‌شود. هنگامی که به محل اتصال این دو مفتول حرارت داده شود، اختلاف پتانسیلی در دو سر این مفتول‌ها بوجود می‌آید. این اختلاف پتانسیل تابع میزان حرارت اعمال شده است و بنابراین با بررسی میزان ولتاژ خروجی می‌توان درجه حرارت اعمال شده به ترموکوپل را تشخیص داد. شکل ۳ مراحل تست ورم را نشان می‌دهد. نمونه‌ای از ورق شکل گرفته در تست آزمایشگاهی در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۳ مراحل تست ورم

1. Deformable
2. Analytical rigid

شکل ۸ ورق شکل گرفته در نرم افزار و توزیع ضخامت ورق را نشان می دهد. در این شبیه سازی، به دلیل تقارن مدل، تحلیل در نیمی از هندسه انجام می شود و ورق، قالب و ورق گیر به صورت نیمه متقارن محوری مدل می شوند و تنها نیمه راست ورق المان بندی شده است.

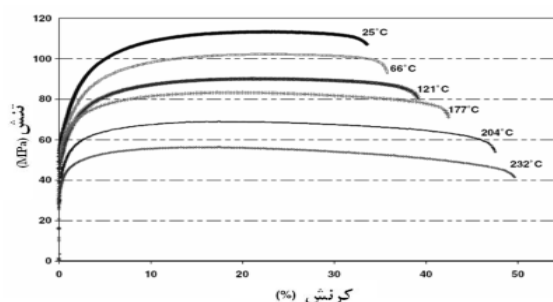


شکل ۸ ورق شکل گرفته در نرم افزار المان محدود

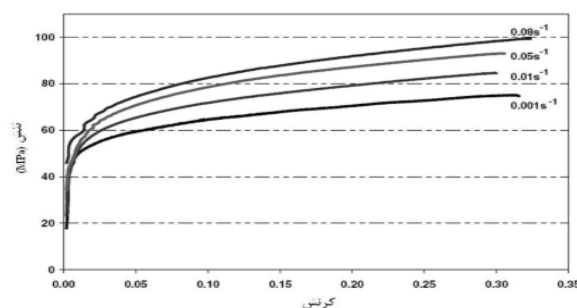
در شبیه سازی نمودارهای حد شکل دادن (FLD)<sup>۳</sup> برای AA۳۰۰۳ به دست آمده توسط ابدرابو [۱۰]، مطابق شکل ۹ به کار برده می شود.

این نمودارها در درجه حرارت اتاق و بالاتر، توسط تابع تسلیم غیرهمسانگرد بارلات<sup>۴</sup>، YLD96 و ضرایب مناسب برای هر درجه حرارت توسط مدل M-K محاسبه شده است. تابع تسلیم غیرهمسانگرد YLD96 ارائه شده توسط بارلات و همکارانش یکی از دقیق ترین توابع تسلیم برای ورق های آلایژ آلومینیوم می باشد. در محاسبه این نمودارها فرض شده است که مسیر بارگذاری به شرایط خطی نزدیک باشد تا کاربرد منحنی حد شکل دادن بر اساس کرنش را برای تعیین دقیق شکست ورق قابل قبول باشد.

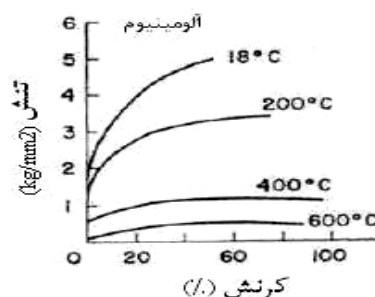
به منظور تعیین نمودار تنش-کرنش ماده در درجه حرارت ها و نرخ های کرنش مختلف، تست های کشش داغ تک محوره انجام می شود. در شبیه سازی خواص AA۳۰۰۳ به دست آمده توسط ابدرابو<sup>۱</sup> [۸] و کیولاکوف<sup>۲</sup> [۹]، مطابق شکل های ۵، ۶ و ۷ به کار برده می شود.



شکل ۵ نمودار تنش-کرنش برای آلایژ آلومینیوم ۳۰۰۳ در دماهای مختلف [۶]



شکل ۶ نمودار تنش-کرنش برای آلایژ آلومینیوم ۳۰۰۳ در نرخ های کرنش مختلف در دمای ۲۰۰ C [۶]

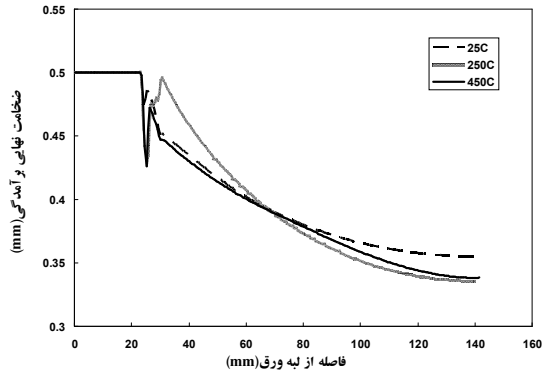


شکل ۷ نمودار تنش-کرنش برای آلایژ آلومینیوم ۳۰۰۳ در دماهای مختلف [۷]

3. Forming Limit Diagram  
4. Barlat

1. Abedrabbo  
2. Kulakov

(قطب) مشاهده می‌شود و پارگی محصول از این نقطه آغاز می‌شود.

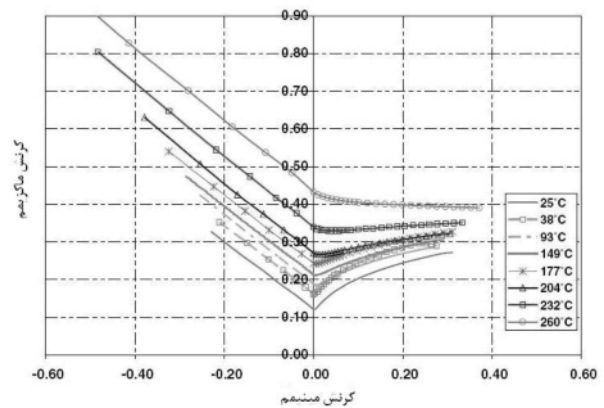


شکل ۱۰ تاثیر افزایش دما بر توزیع ضخامت در محصول با ضخامت اولیه ۰/۵ میلی‌متر

مقایسه نتایج حاصل از بررسی تست آزمایشگاهی و المان محدود نشان می‌دهد، تطابق نزدیکی در نتایج وجود دارد. علت تفاوت موجود مابین این نتایج عبارتند از: کاربرد نتایج تست کشش تک محوره در تحلیل المان نرم‌افزاری فرایندی که ماده تحت تنش تک محوره قرار ندارد، کاربرد ضریب اصطکاک مستقل از دما مابین ورق و اجزای قالب در تحلیل المان نرم‌افزاری. با این وجود درصد خطای مابین نتایج قابل قبول می‌باشد.

جدول ۲ نتایج حاصل از تست آزمایشگاهی

دمای ورق (°C)	ضخامت اولیه ورق (mm)	فشار گاز شکل‌دهی (bar)	ارتفاع حاصله (mm)	کمترین ضخامت (mm)
۲۵	۰/۵	۱۰	۴۸	۰/۳۳
۲۰۰	۰/۵	۶	۴۱	۰/۳۰
۴۵۰	۰/۵	۲	۶۵	۰/۲۸
۲۵	۱/۵	۳۰	۱۰	۱/۴
۳۰۰	۱/۵	۲۶	۳۵	۱/۱



شکل ۹ نمودارهای حد شکل‌دادن برای آلومینیوم ۳۰۰۳ در چند درجه حرارت مختلف [۱۰]

معیار ناپایداری و پارگی ورق در تحلیل نرم‌افزاری در دماهای بالاتر از شکل ۹، بر اساس کرنش ضخامت حاصله بر اساس تئوری هیل، بررسی می‌شود. بر اساس تئوری هیل با داشتن توان کرنش سختی ماده، کرنش ضخامت و در نتیجه ضخامت نهایی تعیین می‌شود.

## ۵- نتایج

نتایج شامل فشار گاز به کاررفته، ارتفاع گنبدی و کمترین ضخامت در نقطه گنبدی شکل در چند نوع شرایط دما و ضخامت اولیه ورق مربوط به تست آزمایشگاهی در جدول ۲ و تحلیل المان محدود در جدول ۳ ارائه شده است.

این نتایج نشان می‌دهد که افزایش دما مقدار فشار مورد نیاز برای شکل‌دهی ورق را کاهش می‌دهد. همچنین با افزایش دما ارتفاع گنبدی افزایش می‌یابد و در نتیجه شکل‌پذیری آلیاژ آلومینیوم به کار رفته، یعنی مقدار قابلیت ماده برای تحمل تغییر شکل پلاستیک بدون شکست، بهبود می‌یابد.

نحوه توزیع ضخامت در دماهای مختلف شکل‌دهی یکسان می‌باشد (شکل ۱۰). ضخامت ورق در فاصله ورق‌گیری مابین قالب و ورق گیر ثابت و برابر با ضخامت اولیه است. در محل شروع خم شدن ورق بر روی شعاع قالب، یک محدوده کاهش و سپس افزایش ضخامت ورق وجود دارد و پس از آن کاهش ضخامت تا رسیدن به مینیمم ضخامت در رأس گنبد ورم

نیاز وجود خواهد داشت. کاهش شدید نیروهای شکل‌دهی در پروسه سبب کاربرد پرس با تناژ کم، کاربرد آسان‌تر درجه حرارت و کنترل درجه حرارت، کاهش نیروی نگهدارنده، فضای کارگاهی مورد نیاز کوچک‌تر و کاهش هزینه‌ها می‌شود. تحلیل المان محدود فرایند شکل‌دهی داغ فلز توسط گاز نشان داد که تطابق مناسب میان نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی برقرار می‌باشد، در نتیجه می‌توان از نتایج شبیه‌سازی المان محدود، به‌عنوان روش قابل اعتمادی برای بررسی‌های امکان‌پذیری، تعیین شرایط و پارامترهای مؤثر فرایند استفاده نمود.

## ۷- مراجع

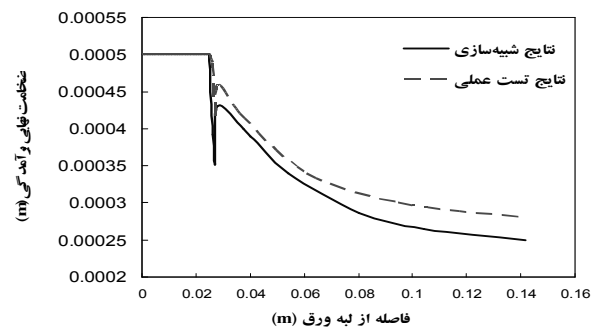
- [1] Hartl, Ch, "Research and advances in fundamentals and industrial applications of hydroforming", Journal of Materials Processing Technology, 167, 383–392, 2005.
- [2] Dykstra B, "Hot Metal Gas Forming for Manufacturing Vehicle Structural Components", Metal forming, Sept. 2001, pp.50.
- [3] Gardner. B, "Business case for use of Hot Metal gas forming", Metal Forming (October, 2001).
- [4] Kim, H.S., Koç, M., Ni, J., "Determination of Proper Temperature Distribution for Warm Forming of Aluminum Sheet Materials", ASME, Vol. 128, pp. 622-632, 2006.
- [5] Khraisheh. M, "On the failure characteristics of superplastic sheet materials subjected to gas pressure forming", Published by Elsevier Science Ltd, Scripta mater. 42 (2000) 257–263.
- [6] Johnson, W and Mellor, P B, Engineering Plasticity, Ellis Horwood Limited, 1983.
- [7] ASM handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special, Tenth Edition.
- [8] Abedrabbo, N, Pourboghtr, F and Carsley, J, "Forming of aluminum alloys at elevated temperatures – Part 1: Material characterization", International Journal of plasticity, 22:314-341, 2006.
- [9] Kulakov, M, Ultrasonic consolidation of Al3003-H18, Materials Science and Engineering, Clemson University, December 2007.
- [10] Abedrabbo, N, Zampaloni, M A, Pourboghtr, F, "Wrinkling control in aluminum sheet hydroforming", International Journal of Mechanical Sciences, 47, 333–358, 2005.

جدول ۳ نتایج حاصل از تحلیل المان محدود

دمای ورق (°C)	ضخامت اولیه ورق (mm)	فشار گاز شکل‌دهی (bar)	ارتفاع حاصله (mm)	کمترین ضخامت (mm)
۲۵	۰/۵	۹	۴۰	۰/۳۲۱
۲۵۰	۰/۵	۴/۵	۴۵	۰/۲۷۱
۴۵۰	۰/۵	۱/۹	۶۷	۰/۲۵۰
۲۵	۱/۵	۴۰	۹/۷	۱/۳۹
۳۰۰	۱/۵	۳۰	۴۱	۱/۳۷

با مقایسه نتایج حاصل از دو مقدار ضخامت اولیه ورق، در هر یک از تحلیل‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزاری مشخص می‌شود که فشار مورد نیاز برای شکل‌دهی ورق با افزایش ضخامت ورق به میزان قابل توجهی (در بررسی حاضر در حدود ۳ برابر) افزایش می‌یابد. با توجه به کاربرد فشار گاز در این روش و رعایت ایمنی می‌توان نتیجه گرفت که این روش در شرایط کاربرد تست فعلی با پرس کم تناژ، برای ورق‌های با ضخامت کم (کمتر از ۱ میلی‌متر) مناسب می‌باشد.

مقایسه توزیع ضخامت در شرایط دمایی حاصل از تست آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱ مقایسه توزیع ضخامت حاصل از تست آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  ورق

## ۶- نتیجه‌گیری

در این بررسی روش نوین شکل‌دهی داغ توسط گاز، امکان رسیدن به بالاترین دمای شکل‌دهی را فراهم می‌کند و با افزایش دمای ورق تا دمای بهینه کاهش قابل توجه فشار مورد